

# Celdas solares orgánicas: una tecnología viable para México

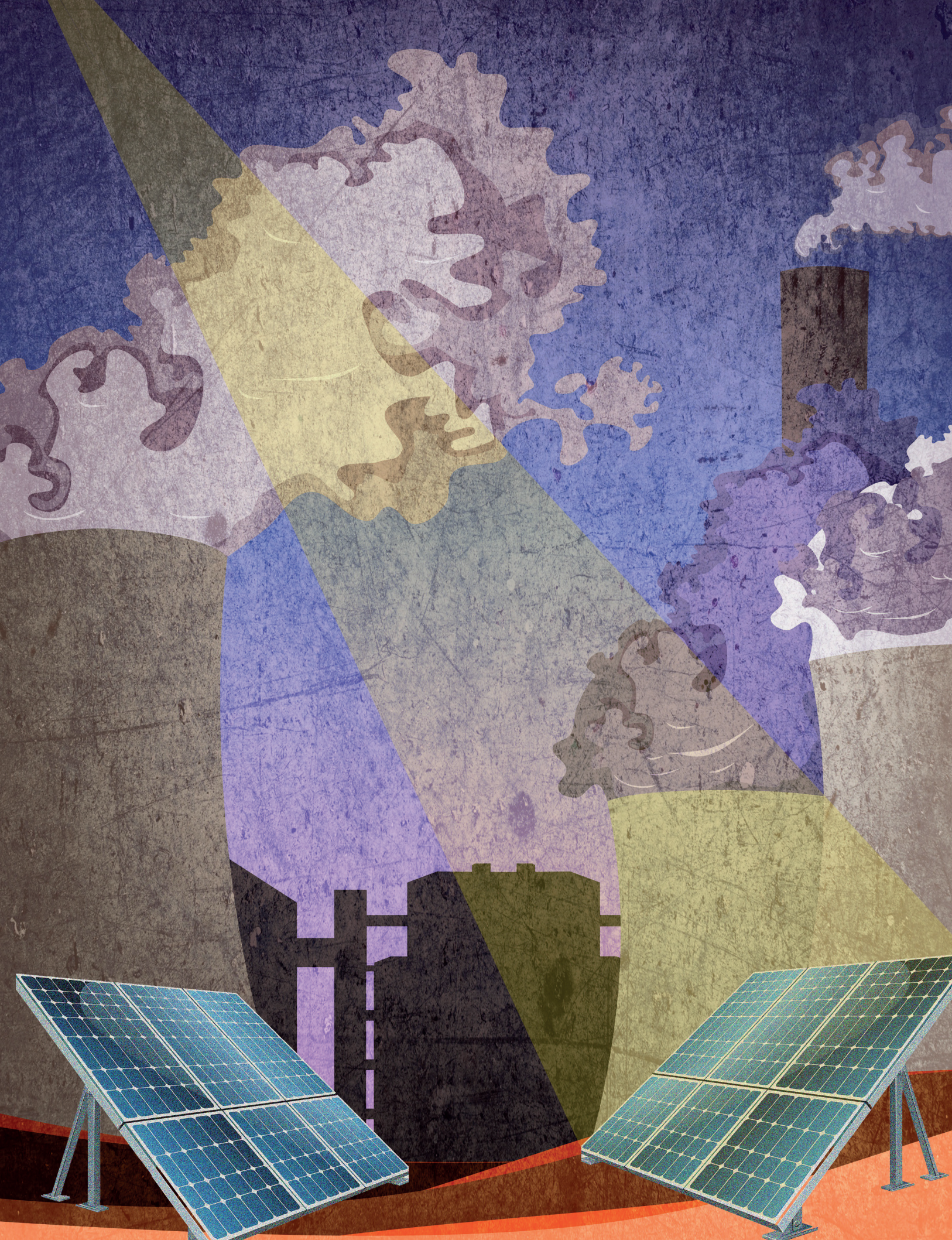
El aprovechamiento de la energía solar para generar electricidad por medio de las celdas solares representa una gran alternativa para el desarrollo de la energía renovable. En este artículo se presentan las celdas solares orgánicas como fuentes potenciales para aumentar la capacidad instalada, destacando características como su flexibilidad, transparencia y bajo costo. Además, se reporta la investigación desarrollada en el país y la industrialización de estos dispositivos.

## Introducción

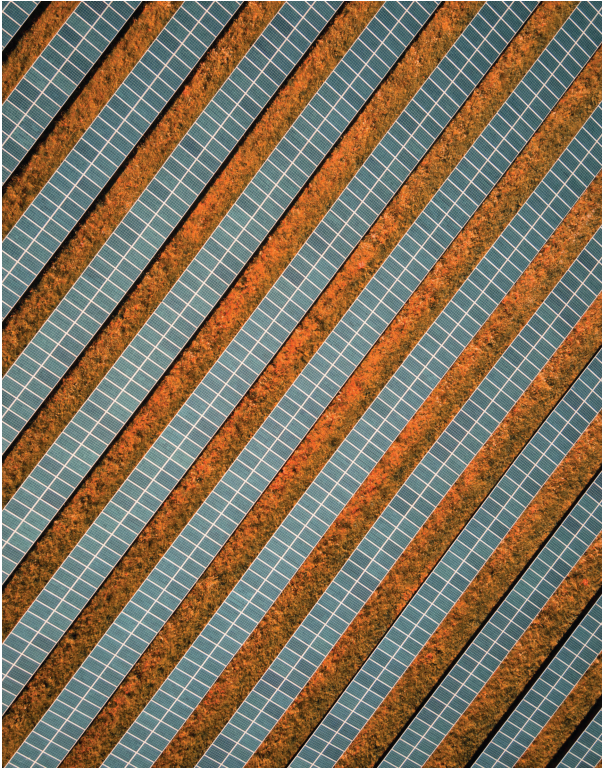
Actualmente, el crecimiento de la población mundial, junto con el desarrollo tecnológico y el fácil acceso a bienes de consumo, ha elevado significativamente la demanda de energía eléctrica y, con ello, el consumo de energías de fuentes no renovables, especialmente las derivadas de combustibles fósiles. Este uso excesivo de fuentes fósiles es responsable de gran parte de las emisiones de gases de efecto invernadero, que contribuyen directamente al calentamiento global. En respuesta a esta situación, varios países se han unido para desarrollar tratados que promueven la sostenibilidad ambiental y que buscan reducir el impacto del cambio climático. Un ejemplo de estos tratados es el Acuerdo de París, cuyo objetivo principal es limitar el aumento de la temperatura en este siglo a un máximo de 2 °C.

De acuerdo con el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (GEI), emitido en el 2015 por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), México ocupaba el décimo segundo lugar a nivel global con una emisión de 665 304.92 Gg de CO<sub>2</sub> (1 Gg = 1 000 toneladas; el gigagramo es una unidad de medida de masa en el sistema métrico decimal utilizada principalmente para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero y en estudios de impacto ambiental). Por esta razón, la Secretaría de Energía (Sener) en el 2015 se trazó como meta el aumento de la generación de energía eléctrica a partir de energías renovables en un 30 % para 2021 y en un 35 % para 2024 (Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024). Este compromiso se evidenció en el informe de Prospectiva de









Energías Renovables 2016-2030 de la Sener, donde se reportó que en 2015 el país ya presentaba un incremento del 6.6 % en la capacidad instalada de energía renovable en comparación con el año anterior. Estos avances y las proyecciones de los planes de desarrollo energético son motivados, por una parte, por las importaciones de energía eléctrica que ha tenido que realizar el país para cumplir con su demanda; por otra parte, por la disposición privilegiada de recursos renovables que tiene el país, como lo demuestra el hecho de que el 85 % del territorio mexicano tiene condiciones óptimas de radiación solar.

La tecnología que utiliza las celdas solares para convertir la energía solar en eléctrica ha experimentado un enorme avance. La fabricación de paneles solares se ha vuelto rentable debido a la reducción de costos y mejoras en la eficiencia de conversión. En este momento, el dominio del mercado (85 %) lo tienen las celdas solares de silicio por su bajo costo, abundancia y capacidad para utilizarse en instalaciones de escala de gigawatts ( $10^9$  W). Las investigaciones han mostrado que el límite teórico de eficiencia de las celdas solares de silicio monocristalino es de 29.05 %. Por esta razón, se está incursionando

en tecnologías con nuevos materiales semiconductores que mejoren significativamente la cobertura en la capacidad instalada a nivel mundial. Entre ellas, las celdas solares basadas en materiales orgánicos son potencialmente atractivas, ya que pueden ser transparentes, flexibles, de bajo peso y pueden instalarse en superficies curvas.

#### ■ Aprovechamiento de la energía solar en México

■ México tiene un gran potencial para el aprovechamiento de la energía solar debido a su ubicación geográfica, ya que es uno de los países con mayor irradiancia promedio anual en el mundo ( $5.3 \text{ kWh/m}^2$  por día, según Conagua, 2012). Al realizar una comparación con Alemania, un país puntero en el aprovechamiento de la energía solar, se aprecia que la generación de energía eléctrica con fuente solar en México es de 114.2 GWh, 44 veces menor a la producción de Alemania, de 5 047 GWh a partir de una irradiancia promedio anual de  $1.1 \text{ kWh/m}^2$  por día, según datos recopilados por el CIEP (Centro de Investigación Económica y Presupuestaria, A. C., 2017).

Para aumentar la capacidad instalada de fuentes energéticas en el país, se han propuesto diferentes proyectos e inversiones que promueven la implementación de tecnologías que aprovechan el recurso de la radiación solar. Uno de los proyectos pioneros fue el de Sonntlan (1979-1985), en el que los gobiernos de México y Alemania Occidental invirtieron en un generador fotovoltaico de 250 W en Baja California Sur. En 1984 el gobierno alemán se retiró y en ese mismo año el gobierno mexicano cedió el proyecto a la Universidad Autónoma de Baja California Sur. Uno de los proyectos más conocidos fue el instalado en Baja California Sur (26 de marzo 2014) por parte del Corporativo Aura Solar, que representó la central fotovoltaica más grande del país, pero lamentablemente fue destruida en gran parte por el huracán Odile, el 15 de septiembre de 2014. En la actualidad, la central se encuentra operando y su producción de energía renovable es equivalente al 60 % del consumo energético de los habitantes de La Paz.

En este momento, en México se encuentran funcionando 23 centrales fotovoltaicas, en su mayoría

ubicadas en Baja California Sur, Durango, Chihuahua y el Estado de México, las cuales han reportado una generación de electricidad, desde el 2017, de 344 GWh, según el Informe de Labores 2019-2020 de la Sener. En estos proyectos se emplea como tecnología principal las celdas solares inorgánicas convencionales, que son cuadradas, planas, rígidas y pesadas. Para el aprovechamiento de la energía solar a gran escala, se ha hecho un gran esfuerzo por implementar nuevas tecnologías, como las celdas solares orgánicas (cso). La compañía Engie, con su campaña Harmony, ha instalado en la Ciudad de México, bajo el proyecto “Solar Graffiti”, las primeras cso fabricadas por Heliatak para implementar energía renovable en las urbes y resolver los principales problemas de la ciudad, que son el espacio disponible y el exceso de peso en los inmuebles; esta tecnología se vale de la flexibilidad de los semiconductores orgánicos para diseñar módulos solares curvos y adaptables a diferentes superficies.

### ■ Celdas solares orgánicas: ■ una alternativa prometedora

■ Las cso son dispositivos que transforman la energía solar en energía eléctrica mediante el aprovechamiento de la radiación que llega a la superficie de la Tierra, en un proceso conocido como **efecto fotovoltaico**, similar al de las celdas solares convencionales inorgánicas. Es importante destacar que las cso pertenecen a la tercera generación de tecnologías fotovoltaicas. Los materiales orgánicos que componen las cso son compuestos que contienen enlaces de carbono (C), en combinación con otros elementos, como el hidrógeno ( $H_2$ ) y oxígeno ( $O_2$ ). Entre estos elementos se encuentran polímeros, oligómeros y monómeros orgánicos que se distinguen de sus versiones inorgánicas por su estructura y propiedades. Aunque también existen variantes inorgánicas de estos compuestos, en las cso se emplean exclusivamente materiales orgánicos. Las celdas están constituidas por una capa activa, compuesta de una **heterounión** de dos materiales semiconductores orgánicos, un material que transporta carga negativa (llamado material aceptor) y otro que transporta car-

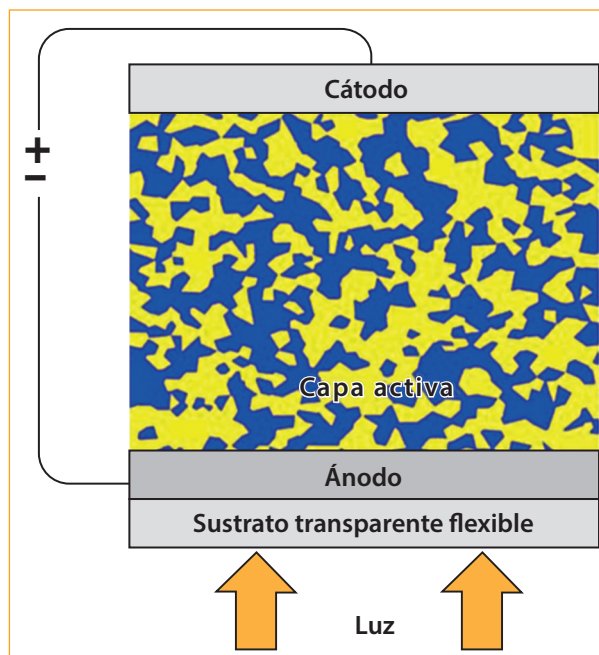


Figura 1. Esquema de la estructura fundamental de una cso.

ga positiva (llamado material donador), tal como se ilustra en el esquema de la **Figura 1**. Adicionalmente, la celda cuenta con dos electrodos que recolectan los portadores de carga, permitiendo la generación de corriente eléctrica.

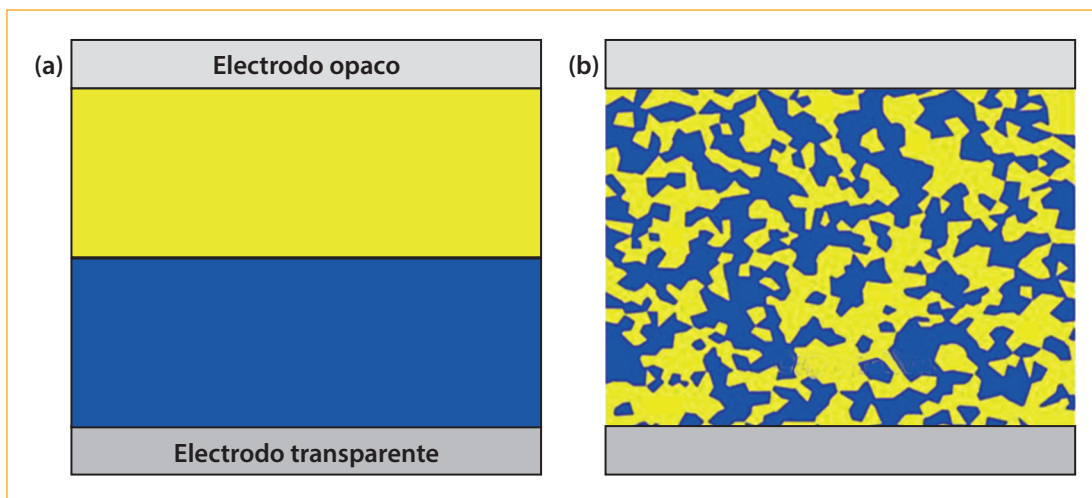
En la actualidad, para aumentar la eficiencia del dispositivo se agregan, en la unión de la capa activa con los electrodos, dos capas transportadoras de carga, una de carga positiva y otra de carga negativa. Otra forma de aumentar la eficiencia del dispositivo es uniendo más de dos capas activas de diferentes materiales para absorber una mayor cantidad de luz, formando así las denominadas cso de unión múltiple (tándem o sándwich), que puede alcanzar eficiencias, según estudios teóricos, de más de 40% a costos bajos (IEA, 2011).

Los primeros dispositivos orgánicos se elaboraron en la década de los ochenta, formados por una estructura de una sola capa y reportaron eficiencias menores al 1%. Desde entonces, se han desarrollado investigaciones para optimizar las cso, lo que dio paso a estructuras bicapa o de heterounión plana (véase la **Figura 2a**), formadas por una capa de un material aceptor y otro donador, demostrando que se deben considerar los efectos que suceden

**Efecto fotovoltaico**  
Es un fenómeno físico en el que un material genera una corriente eléctrica al ser expuesto a la luz.

**Heterounión**  
Es la interfaz entre dos materiales semiconductores con diferentes propiedades electrónicas, para optimizar el rendimiento de dispositivos optoelectrónicos.





**Figura 2.** Esquema de la capa activa de una CSO con forma de: a) bicapa, b) heterounión de volumen desordenada. En color azul y amarillo se representan las regiones de los materiales aceptores y donadores, respectivamente.

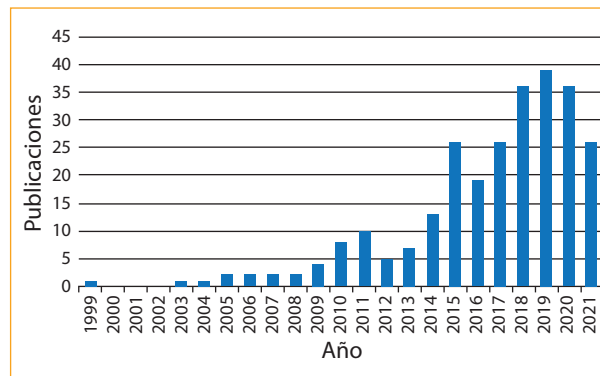
internamente en la capa activa. En la década de los noventa, se descubrió que hay mejor transferencia de portadores de carga usando un polímero como material donador y un fullereno como material aceptor. En 1995 se propuso la estructura de heterounión de volumen (BHJ, por sus siglas en inglés: *bulk hetero junction*), en la cual se disuelve la mezcla binaria de los materiales aceptores y donadores en el mismo disolvente, logrando una mejora en el transporte de portadores de carga (véase la **Figura 2b**). También, se identificaron dos materiales que en la actualidad son los más utilizados. El polímero P3HT y el fullereno PCBM (Berger y Kim, 2018). Estos materiales presentan propiedades adecuadas para el transporte de carga más efectivo y su uso ha permitido la implementación del método de impresión rollo a rollo para la fabricación a gran escala. Con el desarrollo de nuevos materiales orgánicos semiconductores, se logró que en el 2018 se desarrollaran CSO con estructura tándem y eficiencias superiores al 17 %, y en el 2020, superiores al 18 por ciento.

Las CSO tienen dos desventajas respecto a su contraparte inorgánica: presentan bajas eficiencias de conversión de energía y tienen cortos tiempos de vida. Por el momento, el récord de eficiencia experimental reportado para películas delgadas es de 18.6 %, menor a la que presentan las películas delgadas de silicio monocristalino, que es de 26.7 %. No obstante, debido a la gran diversidad de materiales semiconductores

orgánicos, la eficiencia ha aumentado en los últimos diez años más del 8 %. Por otro lado, el tiempo de vida de las celdas fotovoltaicas orgánicas encapsuladas es menor a 10 años, baja en comparación con las celdas de silicio (25 años). Para mejorar este inconveniente se han estado investigando nuevos materiales aceptores, donadores y metales de contacto.

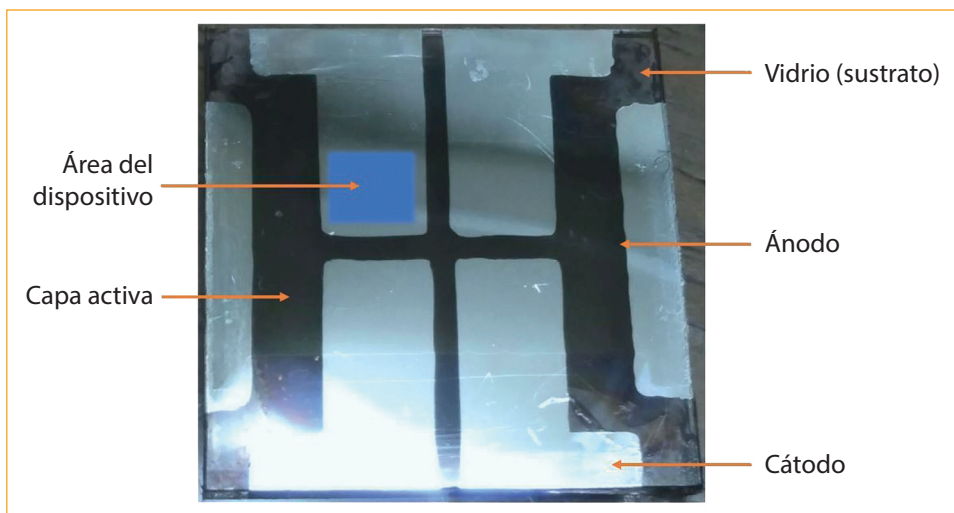
### ■ Investigación de celdas solares orgánicas en México

En la última década, varios grupos de investigación (particularmente en México) han incrementado el número de trabajos relacionados con las CSO, como se puede observar en la **Figura 3**. Los centros de in-



**Figura 3.** Publicaciones por año de instituciones mexicanas relacionadas con las CSO (información obtenida de la base de datos de la página Web of Science Core Collection, 2021).





**Figura 4.** Celda solar orgánica con eficiencia de conversión del 10 %, desarrollada en el grupo de investigación de la doctora Magali Estrada de la SEES -Cinvestav.

vestigación e instituciones de educación superior están sumando esfuerzos en el desarrollo de cálculos teóricos, así como en la síntesis de nuevos compuestos orgánicos para incrementar el tiempo de vida y la eficiencia de las celdas. Por ejemplo, el Cinvestav y el Instituto Politécnico Nacional han contribuido al avance en las cso en México, ya que se han fabricado en laboratorio cso con eficiencias de alrededor del 10 % (dispositivo mostrado en la **Figura 4** con un área de 0.09 cm<sup>2</sup>), en la Sección de Electrónica del Estado Sólido del Cinvestav (Ramírez-Como *et al.*, 2021). Además, se han realizado estudios teóricos de los procesos en el interior de la celda solar orgánica para optimizar su desempeño en la Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas del IPN (Lastra *et al.*, 2019) (Flores-Contreras y cols., 2019).

#### ■ Industrialización de las celdas solares orgánicas

■ Las características de las cso son muy atractivas; aun así, no es tan común la industrialización de esta tecnología. Konarka Technologies, cofundada por el premio Nobel de Química Alan J. Heeger, apostó por comercializar este tipo de tecnología durante 11 años, logrando dispositivos que tenían una eficiencia del 4 %. Otro ejemplo es Heliatek, empresa alemana fundada en 2006 en la Universidad Técnica

de Dresden, que desde 2012 lanzó al mercado su primera línea de producción de celdas solares tándem con 13.2 % de eficiencia y con productos que tienen un tiempo de vida de 20 años. La producción de las cso se lleva a cabo por medio de la técnica de síntesis de recubrimiento rollo a rollo, que permite un gran volumen, alto rendimiento, larga vida útil y alta eficiencia en los dispositivos.

Las cso no son el sustituto de las celdas convencionales; son una tecnología complementaria asequible, pues se estima que la producción de estos módulos es 59.6 % menor respecto a los módulos de silicio (Kalowekamo y Baker, 2009).

#### ■ Conclusión

■ Las cso presentan propiedades como la flexibilidad, semitransparencia y bajo peso, lo que las convierte en dispositivos atractivos y de alta relevancia para el aprovechamiento de la energía solar en lugares no accesibles para las celdas convencionales. Estas características posicionan a las cso como una tecnología complementaria a las opciones convencionales. Además, el avance científico y la industrialización en la última década de las cso se debe a que su producción es de bajo costo, a que las técnicas de elaboración son simples y los materiales orgánicos empleados son abundantes y de gran diversidad.



Además, es posible optimizar su rendimiento mediante el diseño e innovación de su estructura.

Por el momento, los esfuerzos se centran en la búsqueda de nuevos materiales con propiedades adecuadas para aumentar la eficiencia y el tiempo de vida de los dispositivos. La riqueza que presenta México para el aprovechamiento de la radiación solar ha motivado a diferentes grupos de investigación para desarrollar investigación de alto impacto en este tema, llevando a realizar aportes importantes en la eficiencia y tiempo de vida de las CSO, con lo que se han logrado eficiencias superiores al 10 por ciento.

Se agradece a la doctora Magali Estrada del Cueto y su grupo de investigación de la SEES-Cinvestav por la fotografía de la celda solar experimental, y al doctor Víctor Cabrera Arenas por la revisión del artículo. Y. L. Casallas-Moreno agradece al proyecto de Ciencia de Fronteras 2023, núm. CF-2023-I-1117. Ian C. Flores agradece al programa "Proyecto de Desarrollo Tecnológico o Innovación para alumnos del IPN, 2024", y Luis M. Reséndiz agradece al proyecto SIP 20242346 por el apoyo para la realización de este trabajo.

#### Ian Carlos Flores Contreras

Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas, Instituto Politécnico Nacional.  
ifloresc1800@alumno.ipn.mx.com

#### Yenny L. Casallas-Moreno

Conahcyt, Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas, Instituto Politécnico Nacional.  
ycasallasm@ipn.mx

#### Luis Martín Reséndiz Mendoza

Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas, Instituto Politécnico Nacional.  
lresendiz@ipn.mx

#### Referencias específicas

- Berger, P. R. y M. Kim (2018), "Polymer solar cells: P3HT:PCBM and beyond", *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 10(1):013508.
- Flores-Contreras, Ian C., V. Cabrera y L. Reséndiz (2019), "An algorithm to generate two-dimensional morphologies of organic solar cells", ponencia presentada en la 19th International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices, Ottawa, Canadá.
- International Energy Agency (IEA) (2011), "Solar Energy Perspectives", *International Energy Agency*. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/solar-energy-perspective>, consultado el 11 de noviembre de 2024.
- Kalowekamo, J. y E. Baker (2009), "Estimating the manufacturing cost of purely organic solar cells", *Solar Energy*, 83(8):11224-1231. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.02.003>, consultado el 11 de noviembre de 2024.
- Lastra, G., V. S. Balderrama, L. Reséndiz, J. Pallarès, L. F. Marsal et al. (2019), "Air environment degradation of a high-performance inverted PTB7-Th:PC70BM solar cell", *IEEE Journal of Photovoltaics*, 9(2):464-468.
- Ramírez-Como, M., A. Sacramento, J. G. Sánchez, M. Estrada, J. Pallarès et al. (2021), "Small molecule organic solar cells toward improved stability and performance for Indoor Light Harvesting Application", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 230, 111265.

